

Изучение карбонатных коллекторов специальными петрофизическими методами

Зарипова Л. Ф.^{1,2}, Скибицкая Н.А.¹, Самохвалов Н.И.¹, Коваленко К. В.^{1,2}

¹Институт проблем нефти и газа Российской Академии Наук, РФ (ИПНГ РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

²РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, РФ, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1, E-mail: Lia1999na16@mail.ru

Аннотация

Повышение информативности современного комплекса ГИС требует, помимо стандартного набора петрофизических исследований, выполнять специальные дополнительные исследования. Для детальной характеристики пустотного пространства в работе привлекались специальные методы исследований керна: уникальная установка прямоточной капиллярной пропитки (ПКП) и метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), позволяющие решать ряд важных проблем, к которым относятся определение динамической емкости коллектора и оценка концентрации высокомолекулярных компонентов (ВМК). В работе представлено изучение возможностей специальных методов лабораторных исследований керна, а также реализация применения полученных керновых закономерностей непосредственно в интерпретации ГИС.

Ключевые слова

Коэффициент остаточной заземленной газонасыщенности, прямоточная капиллярная пропитка, остаточная вода, ядерно-магнитный каротаж, динамическая пористость.

Целью работы является определение эффективной и динамической пористости горных пород на основе совместного применения лабораторных данных метода прямоточной капиллярной пропитки (ПКП) и ядерно-магнитного резонанса (ЯМР).

Объект исследования – сложные карбонатные коллекторы Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения.

Петрофизическое обеспечение

1. *Установка прямоточной капиллярной пропитки (ПКП).* Моделирование остаточной водонасыщенности и остаточной структурно-заземленной газонасыщенности проводилось с использованием лабораторных установок Петрофизического центра лаборатории трудноизвлекаемых запасов углеводородов ИПНГ РАН. Определение величины образующихся остаточных (структурно-заземленных) объемов газа в образце породы осуществлялось с помощью уникальной установки прямоточной капиллярной пропитки (ПКП). На рисунке 1 показана модель установки ПКП, созданная Скибицкой Н.А. и Морозовичем Я. Р. [1].

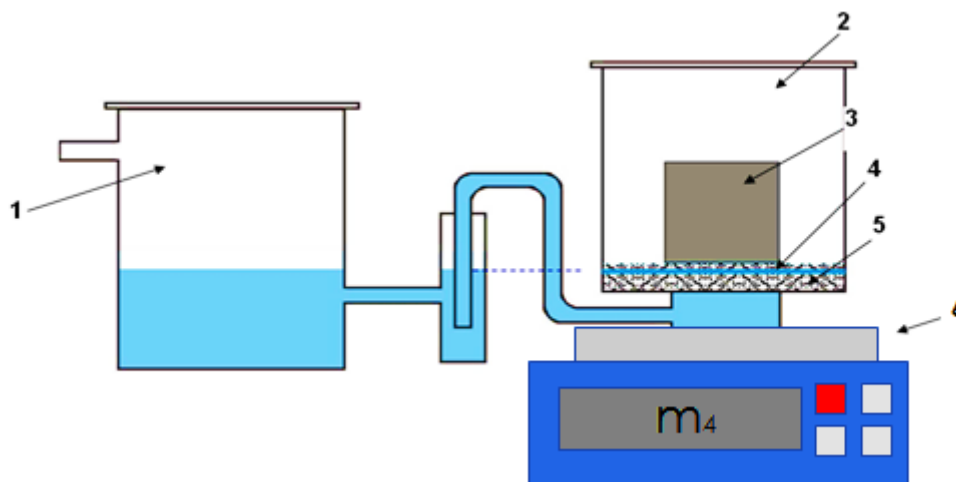


Рисунок 1 – Модель установки ПКП для определения остаточной нефтегазонасыщенности (1 – два сообщающихся между собой сосуда, 2 – место в сосуде для помещения исследуемого образца, 3 – образец породы, 4 – зеркало воды, 5 – пористая подложка с фильтровальной бумагой насыщенная водой, 6 – весы) [составлено авторами]

Перед началом эксперимента весы калибруются эталонной гирей, образец породы в состоянии остаточной водонасыщенности (после центрифугирования) взвешивается на контрольных лабораторных весах.

Как видно из рисунка, стеклянная ёмкость 2 имеет постоянную подпитку водой от специально предназначенного резервуара 1 через систему сообщающихся сосудов. Высота уровня воды в установке в ходе измерений остается неизменной, а за счет действия капиллярных сил вес системы увеличивается в результате впитывания образцом воды. Рабочей жидкостью может служить дистиллированная вода, образец пластовой воды или керосин. Жидкость насыщения не должна вызывать набухание породы, отслаивания частиц, деформацию образца, вступать с веществом породы в химическое взаимодействие, быть токсичной.

Образец породы после центрифугирования взвешивается и помещается в сосуд до момента выхода кривой капиллярной пропитки на горизонтальную асимптоту. Далее по определяют коэффициент остаточной нефтегазонасыщенности по формуле

$$K_{нго} = 1 - \frac{V_{\text{воды ПКП}}}{V_{\text{воды}}} = 1 - \frac{(m_{\text{ПКП}} - m_{\text{сух}})}{\frac{\delta_{\text{флюид}}}{(m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}})}}, \quad (1),$$

где $V_{\text{воды ПКП}}$ – объем воды после ПКП, $V_{\text{воды}}$ – объем воды, насыщающей породу, $m_{\text{ПКП}}$ – масса образца после ПКП, $m_{\text{сух}}$ – масса сухого образца, $m_{\text{нас}}$ – масса насыщенного образца, $\delta_{\text{флюид}}$ – плотность флюида, насыщающего образец.

Коэффициент динамической пористости определяют по формуле

$$K_{\text{пдин}} = K_{\text{п}}(1 - K_{\text{во}} - K_{\text{нго}}), \quad (2),$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент пористости, $K_{\text{пдин}}$ – коэффициент динамической пористости, $K_{\text{во}}$ – коэффициент остаточного водонасыщения, определенный центрифугированием, $K_{\text{нго}}$ – коэффициент структурно-защемленной нефтегазонасыщенности.

2. *ЯМР-релаксометр.* Определения скорости релаксации ядерной намагниченности осуществлялось ЯМР-релаксометром Bruker Minispec mq10 (рисунок 2). Данный анализатор детектирует водород (^1H), фтор (^{19}F) и другие природные ЯМР-активные ядра. Прибор установлен в петрофизической лаборатории РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина и позволяет проводить измерения по определению пористости образцов по методике, предложенной Лазуткиной Н. Е., Шумейко А. Э. и Козко М.Ю с использованием специально изготовленных стандартных образцов, различных по своей природе (таблица 1).

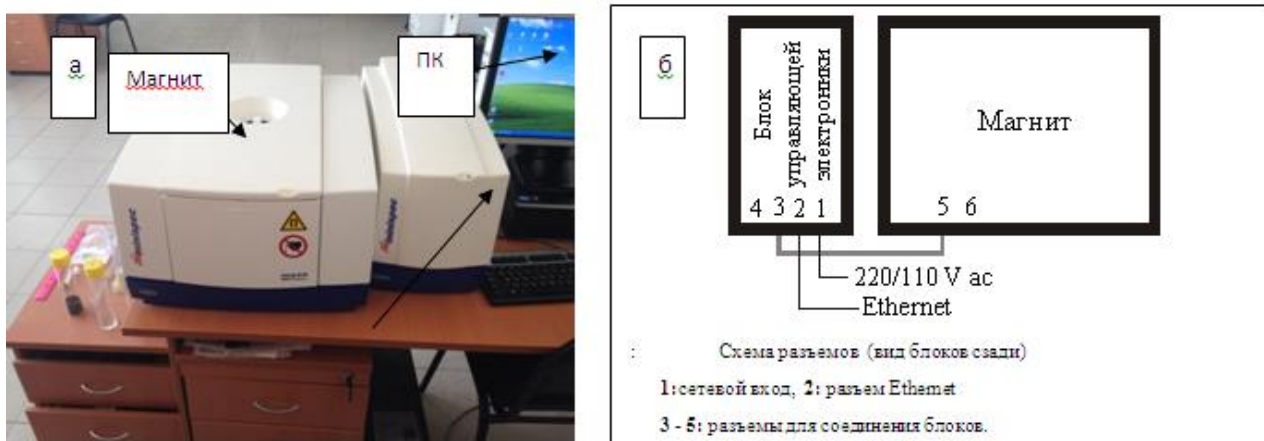


Рисунок 2 – Анализатор Bruker Minispec mq10 (а) и схема составляющих его блоков (б)

Релаксометр Bruker Minispec mq10 состоит из блока магнита, блока управляющей электроники и стандартного пользовательского ПК интерфейса для управления измерениями.

Вычисление пористости ЯМР-релаксометром основано на различии начальных амплитуд спада, получаемых при аппроксимации сигнала (ввиду присутствия мертвого времени), для стандартного образца и водонасыщенного керна. Определение открытой пористости образца горной

породы импульсным методом ЯМР проводится при его 100% насыщенности. При полном насыщении порового пространства горной породы жидкостью объем последней равен объему пор, поэтому амплитуда сигнала ЯМР, которая пропорциональна объему водородсодержащей жидкости, насыщающей поровую среду, характеризует открытую пористость исследуемой породы. Оценка открытой пористости горной породы по образцам стандартного размера выполняется аналогично определению содержания жидкости в породе по формуле (3):

$$K_{\text{по}} = K_{\text{по CO}} \cdot \frac{V_{\text{CO}} \cdot A_u}{V_u \cdot A_{\text{CO}}}, \quad (3),$$

где $K_{\text{по}}$ – коэффициент открытой пористости, $K_{\text{по CO}}$ – коэффициент пористости стандартного образца, A_{CO} и A_u – амплитуды стандартного образца и изучаемого соответственно, а V_{CO} и V_u – их объемы.

С целью построения калибровочной зависимости были использованы стандартные образцы декана в четырёххлористом углероде $\text{C}_{10}\text{H}_{22} + \text{CCl}_4$ с разным объемом водородсодержащего флюида. Параметры стандартных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1– Паспорт стандартного образца $\text{C}_{10}\text{H}_{22} + \text{CCl}_4$

Стандартный образец	W, %	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$, мл	Объем стандартного образца, мл
1	1,12	0,24	21,20
2	9,26	1,95	21,07
3	16,6	3,45	20,81
4	24,4	5,04	20,65
5	31,9	6,53	20,46
6	38,1	7,67	20,14

Перед измерением стандартные образцы нагревались до температуры измерительной камеры ЯМР релаксометра – 40 °С. Температура в измерительном окне прибора устанавливается заведомо изготовителем, что необходимо для снижения погрешности измерения, связанной с температурой окружающей среды. Сушка образцов производилась в нагревательном шкафу. После чего образцы помещались в измерительную область прибора в специальной стеклянной капсуле. Для получения спектров распределения T_2 использовалась стандартная программа CONTIN_ILT, предоставляемая разработчиком прибора.

Калибровочная зависимость для измерения пористости строится на зависимости $A_{\text{изм}} = f(K_{\text{п}})$. В качестве $K_{\text{п}}$ берется отношение объема водородсодержащей жидкости к общему объему жидкости. Полученная калибровочная зависимость изображена на рисунке 3.

Полученная калибровочная зависимость имеет линейный характер связи и высокий коэффициент корреляции. Калибровочная зависимость – это метрологическая характеристика ЯМР-релаксометра, подтверждающая точность работы прибора.

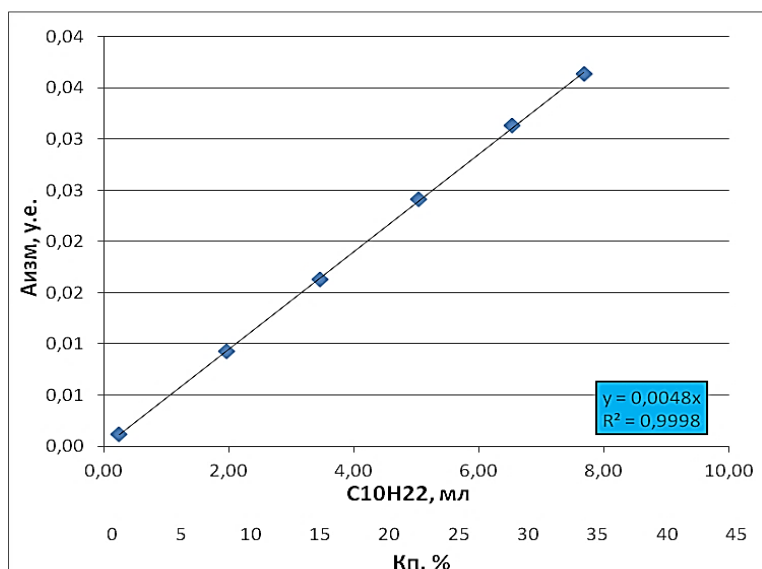


Рисунок 3 – Калибровочная зависимость для измерения пористости, полученная с помощью стандартного образца C10H22+CCl4

Обработка проведенных измерений

В ходе проведенных исследований получены сравнительные характеристики остаточной заземленной газонасыщенности и динамической пористости, определенной по методике прямооточной капиллярной пропитки и по методу ЯМР (рисунок 4).

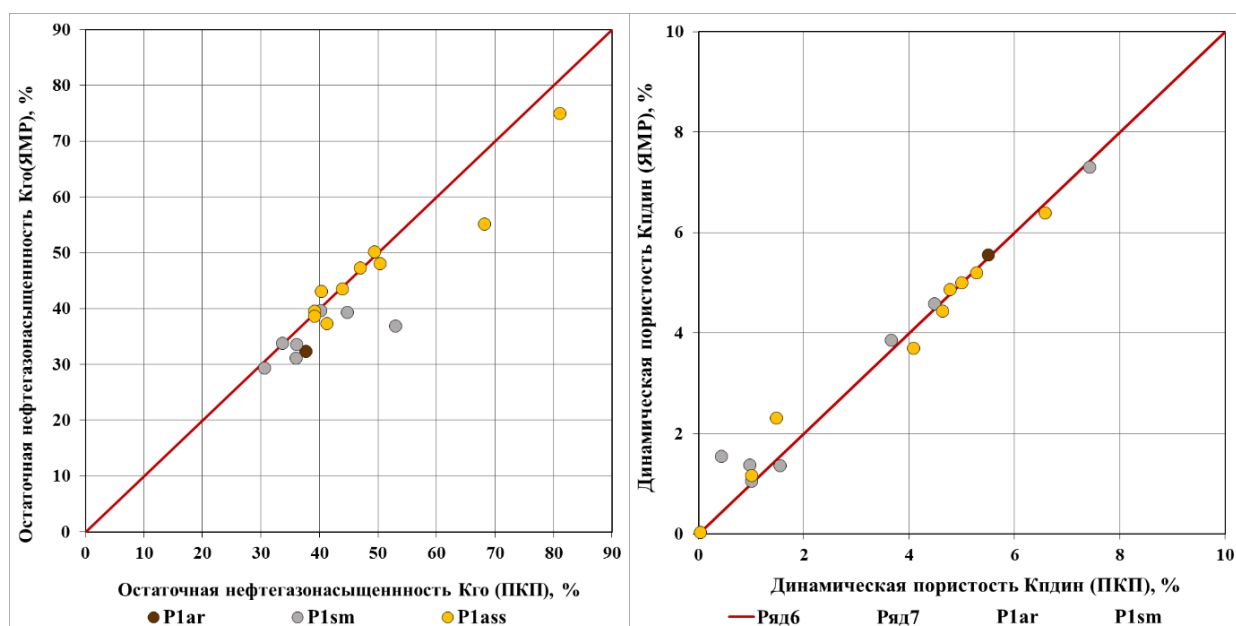


Рисунок 4 – Сопоставление остаточной нефтегазонасыщенности и динамической пористости, определенных по ЯМР с остаточной нефтегазонасыщенностью и динамической пористостью по данным метода ПКП соответственно [составлено авторами]

Результаты хорошо согласуются друг с другом что указывает на возможность применения метода ЯМР для определения динамической пористости.

В процессе исследований образцы в сухом, полностью водонасыщенном состоянии, в условии остаточной водонасыщенности после центрифугирования, и в конце процесса прямооточной капиллярной пропитки при остаточной структурно-заземленной газонасыщенности исследовались при помощи ЯМР-релаксометра.

Информативным параметром ЯМР является время поперечной релаксации T_2 , отражающее распределение пор по размерам. Наиболее распространенным подходом в настройке метода ЯМР при оценке фильтрационно-емкостных свойств коллекторов является подбор величины граничных времен релаксации $T_{2гр}$. Понятие граничной отсечки времени T_2 подразумевает величину, отделяющую поры

малого и крупного размера [2, 3]. Для определения данного значения $T_{2гр}$ использовались интегральные кривые пористости (рисунок 5).

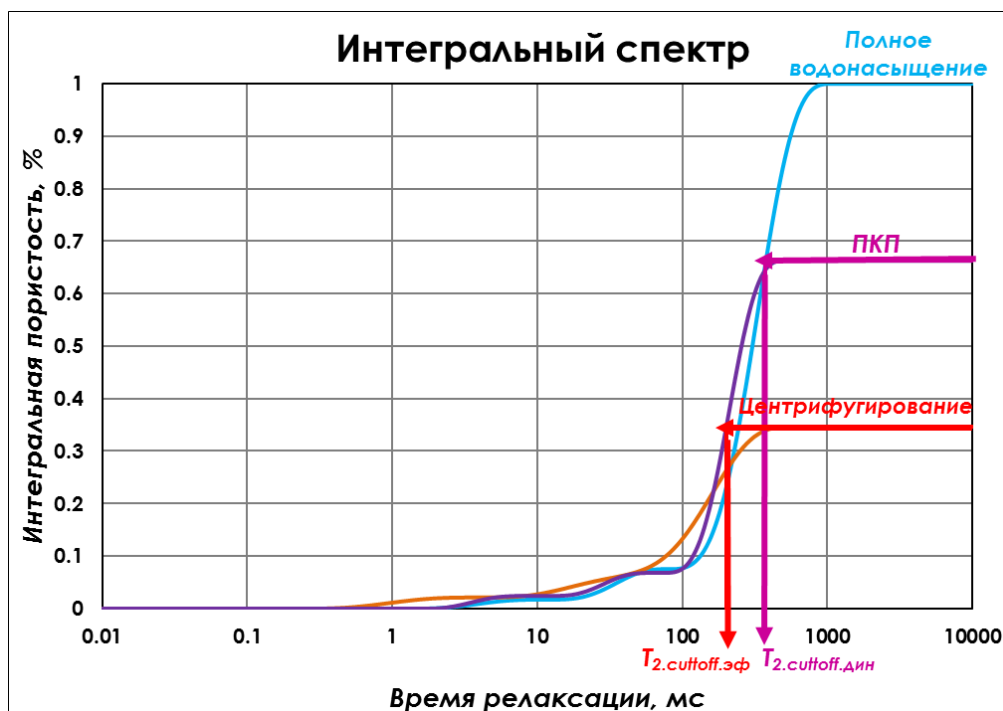


Рисунок 5 – Интегральный спектр ЯМР [составлено авторами]

1. Первая кумулятивная кривая голубого цвета – кривая при 100% насыщении пор водой. Она суммирует все поры – от 0 до 1.
2. Вторая кумулятивная кривая оранжевого цвета — это кривая рассчитанная по спектру, полученному при остаточном насыщении после центрифугирования. Она суммирует все поры от 0 до остаточного водонасыщения $K_{во}$.

Установление граничного значения T_2 производится следующим способом: находится точка пересечения прямой линии (параллельной оси Ox) и кривой интегральной пористости полностью водонасыщенного образца. Далее от этой точки опускается прямая линия к оси T_2 . Значение точки пересечения на оси распределения времени поперечной релаксации является граничным значением T_2 . Описанным способом было найдено граничное значение $T_{2гр}$ для каждого исследуемого образца.

На практике принято считать граничную отсечку фиксированной величиной. В работе было установлено, что граничное значение времени T_2 не является константой, а представляет изменяющуюся по разрезу кривую. Было установлено, что граничная отсечка для определения динамической и эффективной пористости тесно коррелирует с коэффициентом открытой пористости (рисунок 6).

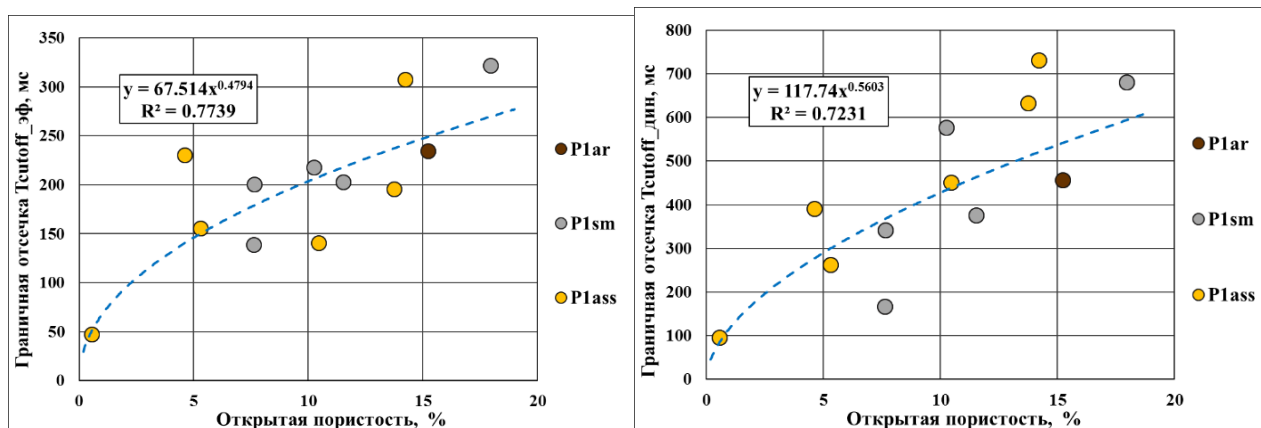


Рисунок 6 – Графики зависимости граничной отсечки времени $T_{2cutoff.эфф}$ и $T_{2cutoff.дин}$ с коэффициентом открытой пористости [составлено авторами]

Авторами рассматривается возможность применения ЯМР для оценки концентрации ВМК. Предполагается, что в сухом состоянии водород, входящий в ВМК, формирует сигнал ЯМР. В петрофизическом центре ИПНГ РАН высокомолекулярные компоненты определялись экстракцией. По результатам измерений получено сопоставление концентраций ВМК, определенной двумя методами (рисунок 7).

Определённая динамическая пористость включает в себя остаточную (защемленную) нефтегазонасыщенность и ВМК. На данном этапе разрабатывается методика расчета граничной отсечки для определения содержания ВМК по ГИС для отделения данных компонентов пористость друг от друга.

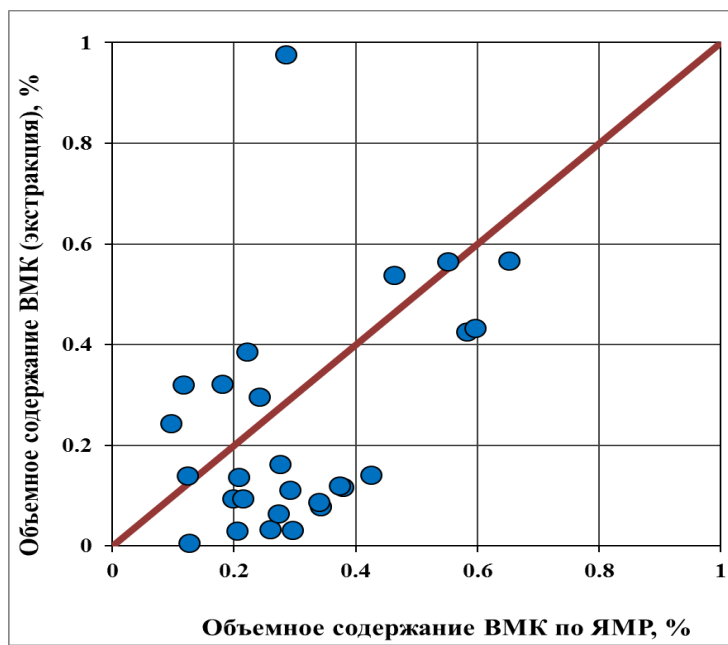


Рисунок 7 – Сопоставление объемного содержания ВМК по ЯМР и по экстракции [составлено авторами]

Заключение

В дополнение к стандартному комплексу лабораторных петрофизических исследований в работе рассмотрены возможности методов прямоточной капиллярной пропитки и ядерно-магнитного резонанса. Результаты экспериментов подтверждают тесную связь методов с ФЕС породы и обуславливают потенциал для дальнейшего изучения возможностей методов для петрофизического моделирования.

Полученные результаты показывают высокую информативность ЯМР в исследовании керна, а также указывают на главное преимущество метода – экспрессность. В работе представлены возможности лабораторного ЯМР в определении динамической пористости и концентрации ВМК, что подтверждает необходимость в проведении измерений ЯМК в скважинах.

Литература

1. Скибицкая Н.А., Большаков М. Н., Кузьмин В. А., Марутян О. О. Закономерности процессов прямоточной капиллярной пропитки в продуктивных карбонатных отложениях Оренбургского НГКМ // Актуальные проблемы нефти и газа – 2018. – №3
2. Джафаров К. С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С. Ф. Применение метода ЯМР для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. М.: Химия, 2002. 439 с.
3. Коатес Дж., М. Праммер, Л. Хиао. ЯМР каротаж. Принципы и применение – Хьюстон: Халлибуртон Энерджи Сервисез, 2001. - 342 с.